بررسی شکست نوری تولید شده توسط ضربان لیزر نانوثانیه در پلکسی گلس با استفاده از روش پرتو گمانه

مرضیه اکبری جعفرابادی، دلارام کاتوزی، و محمد حسین مهدیه

دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران، ایران

چکیده – در این مقاله، دینامیک شکست نوری ایجاد شده در یک هدف دی‌الکتریک شفاف جامد به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. پدیده شکست نوری با استفاده از پرتو لیزر *Nd:YAG* (با طول موج *nm* ۱۰۶۴ و طول ضربان *ns* ۱۰) به عنوان لیزر دمش درون هدف پلکسی‌گلس ایجاد شده است. قسمتی از پرتو لیزر دمش به عنوان پرتو گمانه جدا شده است و به صورت عمود بر پرتو دمش از ناحیه برهم‌کنش عبور داده شده است. پرتو گمانه پس از عبور از پلاسمای تولید شده، توسط فتودیود سریع آشکارسازی و توسط اسیلوسکوپ اندازه گیری شده است. نتایج نشان می‌دهند که میزان عبور پرتو گمانه هنگام عبور از پلاسما، در زمانی بحرانی که چگالی پلاسما به مقداری بحرانی رسیده است شروع به کاهش می‌نماید. با افزایش شدت پرتو لیزر دمش، نرخ رشد چگالی الکترونی پلاسما افزایش می‌یابد و کاهش میزان عبور پرتو گمانه در زمان کمتری اتفاق می‌افتد. نتایج همچنین نشان می‌دهند که با افزایش شدت پرتو دمش، قابلیت عبور پلاسما کاهش می‌یابد.

کلید واژه- دی‌الکتریک شفاف جامد، روش پرتو دمش- گمانه، شکست نوری لیزری، لیزر Nd:YAG.

Dynamics of Laser Induced Breakdown in Plexiglas Using a Pump-Probe Beam Technique

Marzieh Akbari Jafarabadi, Delaram Katoozi, and Mohammad Hossein Mahdieh

Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, the dynamics of optical breakdown in a transparent dielectric material induced by a nanosecond Nd:YAG laser pulse was investigated experimentally. Optical breakdown plasma was induced in PMMA by a Nd:YAG laser beam (operated at 1064 nm and with ~10 ns pulse duration). A portion of the pump laser beam was separated and propagated perpendicularly through the interaction region. Time resolved transmission of the probe beam was used to study the time evolution of the breakdown plasma. The transmitted signal reduces at a threshold time which depends on the pump laser intensity. These results show that the plasma transmissivity decreases with pump laser intensity.

Keywords: Laser induced breakdown, Nd:YAG laser pulse, Pump- probe beam technique, Transparent dielectric material.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

پدیده شکست نوری اولین بار در سال ۱۹۶۲ هنگام بررسی انتشار پرتو لیزر Ruby در هوا مشاهده شد [۱]. پس از آن پدیده شکست نوری به دلیل کاربردهای متعدد از جمله اسپکتروسکوپی شکست نوری لیزری (LIBS[۱]) و همجوشی هسته‌ای به روش محصورسازی اینرسی (ICF[۲]) توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [۳-۲]. پدیده شکست نوری عبارت است از تولید یک پلاسمای گرم و چگال به وسیله متمرکز کردن یک پرتو لیزر ضربانی پرتوان درون یک دی‌الکتریک شفاف جامد، مایع و یا گاز. در شدت‌های بالاتر از شدت آستانه شکست نوری [۴]، قسمتی از پرتو لیزر توسط ماده دی‌الکتریک جذب می‌شود. دو فرآیند غالب جذب انرژی پرتو لیزر در مواد دی‌الکتریک جذب چندفتونی و یونیزاسیون آبشاری می‌باشند. جذب چند فتونی یک فرآیند غیرخطی است که در آن با جذب هم‌زمان چند فوتون، الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش منتقل می‌شود. همچنین انرژی پرتو لیزر توسط الکترون‌های آزاد اولیه که در محیط به علت نقص بلوری و یا ناخالصی وجود دارند، جذب می‌شود. الکترون‌های آزاد می‌توانند در میدان پرتو لیزر انرژی کسب کنند و هنگام برخورد با اتم‌ها یا مولکول‌های دیگر، طی فرآیند تابش ترمزی معکوس، آن‌ها را یونیزه کنند (یونیزاسیون برخوردی). به این ترتیب چگالی الکترون‌های آزاد در ناحیه برهم‌کنش به سرعت افزایش می‌یابد (یونیزاسیون آبشاری) و پلاسما تشکیل می‌شود. پلاسمای تولید شده منبسط شده و موج شوکی تولید می‌کند که با سرعت فراصوتی منتشر می‌شود. سرعت موج شوک با زمان کاهش یافته، نهایتا به صورت یک موج صوتی شنیده می‌شود. در حالت هدف‌های شفاف جامد، انرژی جذب شده به شبکه جامد منتقل می‌شود و نهایتا یک تخریب[۳] دائمی در محل برهم‌کنش باقی می‌ماند.

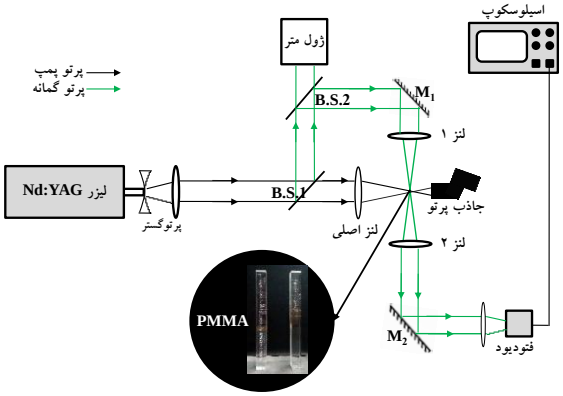
تا کنون روش‌های مختلفی از جلمه روش سایه‌نگاری، تصویربرداری سریع و تداخل‌سنجی برای بررسی پدیده شکست نوری در دی‌الکتریک‌های شفاف استفاده شده است. همچنین از روش پرتو دمش- گمانه برای مطالعه رفتار زمانی پلاسمای تولید شده در هوا توسط لیزر ضربانی نانوثانیه استفاده شده است [۵]. در این مقاله، از روش پرتو دمش- گمانه (با استفاده از یک تک لیزر) برای بررسی شکست نوری تولید شده توسط ضربان لیزر نانوثانیه در پلکسی‌گلس استفاده شده است. این روش پرتو دمش- گمانه یک روش بسیار ساده است که نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی متعدد ندارد. با استفاده از این روش، می‌توان اطلاعاتی را در مورد دینامیک پلاسما در زمان چند نانوثانیه بعد از تابشدهی به دست آورد. قسمتی از پرتو لیزر دمش توسط یک شکافنده پرتو جدا شده و به عنوان پرتو گمانه استفاده شده است. از تحلیل سیگنال‌های عبوری پرتو گمانه می‌توان اطلاعاتی را در مورد دینامیک پلاسمای شکست نوری به دست آورد. نتایج نشان می‌دهند که میزان عبور پرتو گمانه از پلاسمای تولید شده به شدت پرتو دمش بستگی دارد.

۲- آزمایش

شکل ۱ طرحواره‌ای از چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد. پدیده شکست نوری با استفاده از لیزر Nd:YAG با طول موج ۱۰۶۴ nm و طول ضربان ۱۰ ns درون دی‌الکتریک شفاف Poly(methyl methacrylate) (PMMA) با نام تجارتی پلکسی‌گلس ایجاد شده است. پرتو لیزر Nd:YAG پس از عبور از پرتوگستر، توسط شکافنده پرتو ۱ به دو پرتو تبدیل می‌شود. پرتو عبوری از شکافنده پرتو ۱ به عنوان پرتو دمش استفاده شده است. پرتو دمش توسط لنز اصلی با فاصله کانونی ۱۰۰ mm درون PMMA متمرکز می‌شود و پدیده شکست نوری را ایجاد می‌کند. قطر پرتو لیزر در کانون لنز اصلی ۱۵۰ µm می‌باشد. پرتو بازتابیده از شکافنده پرتو ۱ به عنوان پرتو گمانه مورد استفاده قرار گرفته است. هم‌زمان با ایجاد پدیده شکست نوری در پلکسی‌گلس، پرتو گمانه به صورت عمود بر پرتو دمش از ناحیه برهم‌کنش عبور می‌کند. پرتو گمانه پس از

۱ Laser Induced Breakdown Spectroscopy
۲ Inertial confinement fusion
۳ Damage

عبور از ناحیه برهم کنش، توسط یک فتودیود سریع آشکارسازی شده و توسط اسیلوسکوپ اندازه‌گیری می‌شود. در هر تابشدهی، بخشی از پرتو گمانه به یک ژول‌متر فرستاده می‌شود و انرژی پرتو لیزر در هر تابشدهی اندازه‌گیری می‌شود.

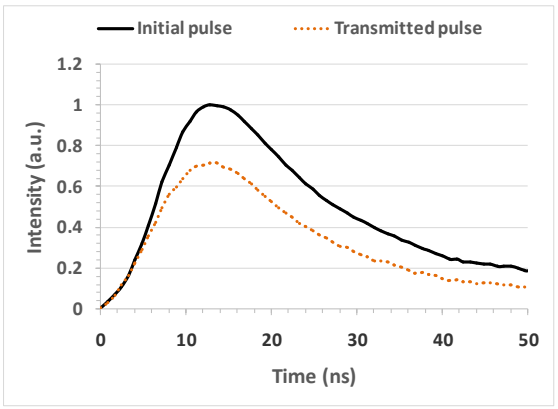


شکل ۱: طرحواره‌ای از چیدمان آزمایش. دراین شکل آینه‌ها و شکافنده‌های پرتو به ترتیب با M و B.S نشان داده شده است.

دینامیک پدیده شکست نوری برای محدوده شدت ۲۰-۷۰ GW/cm^2 (شدت‌های بزرگتر از شدت آستانه شکست نوری در پلکسی‌گلس) بررسی شده است. به این ترتیب که سیگنال پرتو گمانه بر حسب زمان پس از عبور از ناحیه برهم‌کنش در دو حالت ثبت شده است: الف- هنگامی که پرتو دمش مسدود شده است و پرتو گمانه در حالتی که شکست نوری اتفاق نیفتاده است از محل برهم‌کنش عبور می‌کند (ضربان گمانه اولیه) و ب- هنگامی که پرتو دمش درون هدف دی‌الکتریک متمرکز شده و پدیده شکست نوری ایجاد شده است (ضربان عبوری از پلاسما).

۳- بررسی و تحلیل نتایج

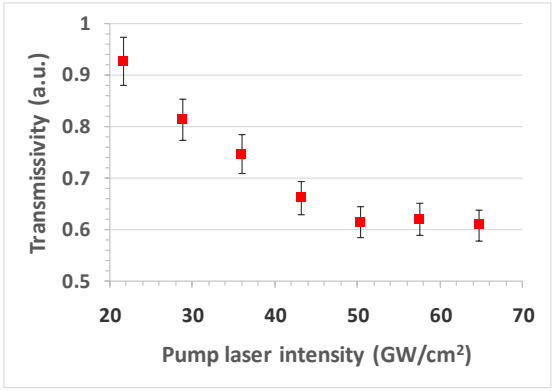
در شکل ۲ نمونه‌ای از سیگنال دریافتی توسط فتودیود در دو حالت مشاهده می‌شود: الف- زمانی که مسیر پرتو دمش مسدود شده است (خط ممتد) و ب- هنگامی که پرتو لیزر دمش با شدت ۴۳/۱ GW/cm^2 باعث ایجاد پلاسما در ناحیه برهم‌کنش می‌شود (نقطه‌چین). همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در زمان‌های اولیه میزان عبور پرتو گمانه از ناحیه برهم‌کنش برای هر دو حالت ضربان گمانه اولیه و ضربان عبوری از پلاسما یکسان است. پس از زمان خاصی که آن را زمان بحرانی می‌نامیم، میزان شدت ضربان عبوری از پلاسما نسبت به شدت ضربان گمانه اولیه کاهش می‌یابد.



شکل۲: یک سیگنال نمونه پرتو لیزر گمانه (با شدت ۰/۲۴ GW/cm^2) در حالتی که پرتو دمش مسدود شده باشد (خط ممتد) و حالتی که پرتو دمش با شدت ۴۳/۱ GW/cm^2 درون PMMA متمرکز شده و شکست نوری ایجاد شده است (خط‌چین).

هنگامی که پرتو لیزر دمش با محیط دی الکتریک شفاف برهم‌کنش می‌کند، جذب بخشی از انرژی پرتو لیزر، باعث ایجاد پلاسما در محدوده زمانی طول ضربان در ناحیه برهم‌کنش می‌شود. در زمان‌های اولیه تشکیل پلاسما، دما و چگالی الکترونی آن افزایش می‌یابد و سپس در اثر انبساط پلاسما و بازترکیب، چگالی و دمای پلاسما کاهش می‌یابند. تغییرات چگالی الکترونی پلاسما در ناحیه برهم‌کنش باعث تغییرات ضریب شکست محیط در آن ناحیه می‌شود. بنابراین، هنگامی که پرتو گمانه در پلاسمای تولید شده انتشار می‌یابد، پرتو گمانه می‌تواند به صورت جزئی جذب و بازتاب شود. در زمان‌های اولیه چگالی الکترونی پلاسما به اندازه کافی زیاد نیست و نمی‌تواند تاثیر محسوسی بر میزان عبور پرتو گمانه از ناحیه برهم‌کنش بگذارد. با افزایش جذب پرتو دمش توسط ماده، چگالی الکترونی پلاسما افزایش می‌یابد. با افزایش چگالی الکترونی، بخشی از پرتو گمانه توسط پلاسما جذب می‌شود و باقیمانده پرتو گمانه از آن عبور می‌کند. بنابراین میزان عبور پرتو گمانه برای ضربان عبوری از پلاسما نسبت به ضربان گمانه اولیه در زمان

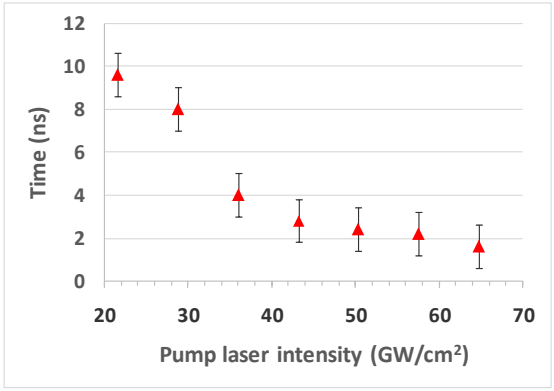
خاصی (زمان بحرانی) شروع به کاهش می‌کند. زمان بحرانی، زمان لازم برای رشد چگالی الکترونی به اندازه‌ای است که در آن چگالی الکترونی، پلاسما به طور قابل ملاحظه‌ای پرتو گمانه را جذب می‌کند. سپس با کاهش چگالی الکترونی پلاسما، جذب پرتو گمانه توسط پلاسما کاهش می‌یابد. بنابراین، میزان بیشتری از پرتو گمانه از ناحیه برهم‌کنش عبور می کند.



شکل ۳: قابلیت عبور پلاسما بر حسب شدت لیزر دمش.

قابلیت عبور پلاسما برای هر شدت پرتو دمش با استفاده از محاسبه انتگرال زمانی سیگنال ضربان عبوری از پلاسما در هر شدت محاسبه و در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که شکل ۳ نشان می‌دهد، قابلیت عبور پلاسما با افزایش شدت پرتو لیزر کاهش می‌یابد. با افزایش شدت پرتو دمش، مقدار انرژی پرتو دمش که توسط ماده جذب می‌شود، افزایش می‌یابد. به همین دلیل، چگالی الکترونی پلاسما با سرعت بیشتری نسبت به شدت‌های پایینتر افزایش می‌یابد. در نتیجه در هر زمان تعداد فوتون‌های بیشتری از پرتو گمانه توسط پلاسما جذب می‌شود.

تغییرات زمان بحرانی بر حسب شدت پرتو دمش در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که شکل ۴ نشان می‌دهد، زمان بحرانی با افزایش شدت پرتو دمش کاهش می‌یابد. کاهش زمان بحرانی نیز به علت افزایش سرعت رشد چگالی الکترونی با افزایش شدت پرتو دمش می‌باشد. به این ترتیب چگالی الکترونی در زمان کمتری به مقدار بحرانی خود برای جذب قابل ملاحظه پرتو گمانه می‌رسد.



شکل ۴: زمان بحرانی برای شروع کاهش میزان عبور ضربان عبوری از پلاسما بر حسب شدت پرتو لیزر دمش.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تاثیر شدت پرتو دمش بر میزان عبور پرتو گمانه از پلاسمای تولید شده در برهم‌کنش لیزر ضربانی نانوثانیه با هدف پلکسی‌گلس به صورت تجربی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که سرعت رشد چگالی الکترونی پلاسمای ایجاد شده با افزایش شدت پرتو دمش افزایش می‌یابد. بنابراین در شدت‌های بالاتر پرتو دمش، پلاسما زودتر به مقدار بحرانی خود می‌رسد. همچنین قابلیت عبور پلاسما با افزایش شدت پرتو دمش کاهش یافته است.

مراجع

[1] P. D. Maker, R. W. Terhune, C. M. Savage, “Optical third harmonic generation”, Proc. 3rd Int. Conf. Quantum Electronics, Paris: Dunod, pp. 1559-1576, 1964.

[2] I. B. Gornushkin, M. Mueller, U. Panne, J. D. Winefordner, “Insights into linear and rank correlation for material identification in laser-induced breakdown spectroscopy and other spectral techniques”, Appl. Spectrosc. Vol. 62, No. 5, pp. 542-53, 2008.

[3] T. R. Boehly, Y. Fisher, D. D. Meyerhofer, W. Seka, J. M. Soures, D. K. Bradley, “The effect of optical prepulse on direct-drive inertial confinement fusion target performance”, Phys. Plasmas Vol.8, No. 1, pp. 231-236, 2001.

[4] J. Krger, W. Kautek, “Ultrashort Pulse Laser Interaction with Dielectrics and Polymers”, Adv Polym Sci Vol. 168, pp. 247–289, 2004.

[5] M. H. Mahdieh, M. Akbari, J., Z. Bababei, “Optical transmission and reflection of a plasma produced in nanosecond laser induced air breakdown”, Proc. SPIE 9255, XX International Symposium on High-Power Laser Systems and Applications 2014, 92554H, 2015.